

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ავთანდილ სიჭინავა

რადიაციული ზემოქმედების გავლენა მონოკრისტალური Si-Ge
შენადნობების სტრუქტურასა და ფიზიკურ-მექანიკურ
თვისებებზე

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2015 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტზე
ფიზიკის დეპარტამენტში
სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტში

ხელმძღვანელი: ფიზ.მათ.მეცნ. დოქტორი
სტუ-ს სრული პროფესორი გიორგი დარსაველიძე
რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2015 წლის "-----" -----, ----- საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის
სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე,
კორპუსი -----, აუდიტორია -----
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა სტუ-ს ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი: სრული პროფესორი თინათინ კაიშაური

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

შესავალი

თემის აქტუალობა. სილიციუმი უაღრესად მნიშვნელოვან როლს ასრულებს თანამედროვე მიკროელექტრონიკის სხვადასხვა მიმართულების განვითარებაში. ეს გარემოება განსაზღვრავს მის ფუძეზე მაღალეფექტური ახალი მასალების შექმნისათვის წარმოებული სამეცნიერო და ტექნოლოგიური სამუშაოების ფართო მასშტაბებს. უკანასკნელი 10-15 წლის განმავლობაში დადგენილია, რომ მცირე კონცენტრაციის (10^{16} - 10^{18} სმ⁻³) გერმანიუმით ლეგირება აუმჯობესებს სილიციუმის ელექტროფიზიკურ მახასიათებლებს. ეს განაპირობებს რეგულირებადი თვისებების სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მიკროელექტრონიკაში ფართოდ გამოყენების შესაძლებლობას. სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობები წარმატებით გამოიყენება საკონსტრუქციო მასალად მიკრომანქანებში, სენსორებში, ნაწილ ელექტრომექანიკურსა და მიკრო ელექტრომექანიკურ სისტემებში, ნაწილ ტექნოლოგიურ ჰიბრიდულ მასალებში.

განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს გერმანიუმით ლეგირებული სილიციუმის რადიაციული მდგრადობის კვლევა, ვინაიდან ორივე მასალა ხასიათდება ერთი ტიპის კრისტალური მესრით და წარმოქმნიან უწყვეტ მყარ ხსნარებს. სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების სტრუქტურაში დეფექტების ჩასახვის მოდელური წარმოდგენა უმთავრესად დაფუძნებულია სილიციუმთან შედარებით დიდი კოვალენტური რადიუსის გერმანიუმის ატომებთან ლოკალიზებულ შინაგან ძაბვებზე. მათი ზემოქმედებით შესაძლებელია შეიცვალოს დეფექტების წარმოქმნის, მოძრაობისა და თერმული მდგრადობის მახასიათებლები. მოსალოდნელია ასევე გერმანიუმით ლეგირებულ სილიციუმის კრისტალებში დიდი რაოდენობით მცირე ზომის მიკროფორების წარმოქმნა, რომლებიც ქრებიან მაღალ ტემპერატურაზე მოწვით. ბორითა და გერმანიუმით ერთობლივად ლეგირებული სილიციუმის სტრუქტურაში ძაბვები კომპენსირდება, რითაც მცირდება დისლოკაციების ჩასახვის ალბათობა სილიციუმ-გერმანიუმის

ეპიტაქსიურ ფენებში, შესაბამისად უმჯობესდება მათი მახასიათებლები და მდგრადობა. ნახევარგამტარული ხელსაწყოების წარმოებაში გამოყენების თვალსაზრისით საყურადღებოა, რომ 10^{19}სმ^{-3} კონცენტრაციის გერმანიუმის შემცველი სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების ფუძემშრების მექანიკური თვისებები მკვეთრად უმჯობესდება, პრაქტიკულად იხშობა მათ სტრუქტურაში B-O დეფექტების წარმოქმნა. მზის სხივების ხანგრძლივი ზემოქმედებით უარესდება სილიციუმის ფუძეზე შექმნილი მზის ელემენტების მახასიათებლები, მაშინ როდესაც სილიციუმ-გერმანიუმის ეფექტურობა მზის სხივების დასხივების იმავე პირობებში უმნიშვნელოდ იცვლება.

სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მასიური კრისტალებისა და ეპიტაქსიური სტრუქტურების სისტემატურმა კვლევებმა გამოავლინეს ნახევარგამტარულ ხელსაწყოთმშენებლობაში მათი გამოყენების რეალური შესაძლებლობები. სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების, ეპიტაქსიური სტრუქტურებისა და სხვადასხვა დანიშნულების მაღალეფექტური ფოტოელექტრული გარდამქმნელების მახასიათებლების კომპლექსური კვლევით შესაძლებელია განხორციელდეს მათი მართვა, პროგნოზირება და დიაგნოსტიკა. აღნიშნული გარემოება განაპირობებს სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების ფუძემშრებისა და p-n სტრუქტურების თვისებების კომპლექსური კვლევის აუცილებლობასა და აქტუალობას.

მეცნიერული და პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით მეტად საინტერესოა სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების სტრუქტურულად მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ექსპერიმენტული კვლევა მაღელვრებელი გერმანიუმის ატომების ფართო დიაპაზონში ცვლილების პირობებში. აღნიშნულიდან გამომდინარე მიზანშეწონილია ექსპერიმენტულად დადგინდეს გერმანიუმის კონცენტრაციის, მაღალტემპერატურული დეფორმაციის, თერმული მოწვისა და სხვადასხვა ბუნების რადიაციის გავლენით სტრუქტურული დეფექტების

კონცენტრაციის, ფორმირებისა და მოძრაობის აქტივაციის ცვლილებების კანონზომიერებები განსაზღვრული მახასიათებლების სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების ფუძემშრეებისა და p-n სტრუქტურების შესაქმნელად.

ნაშრომის მიზანია სხვადასხვა კონცენტრაციის ბორითა და გერმანიუმით ერთობლივად ლეგირებული სილიციუმის მასიურ კრისტალებსა და მათ ფუძემშრეებზე ფორმირებული p-n გადასასვლელის მიკროსტრუქტურის, სტრუქტურულად მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებისა და ინფრაწითელი გამოსხივების ახლო არეში ფოტოელექტრული მახასიათებლების კვლევა. კერძოდ, მექანიკური დამუშავებისა და ქიმიური პოლირების, თერმული მოწვისა და გრეხითი დეფორმაციის, მაღალი ენერგიის ელექტრონებითა და არგონის იონებით დასხივების გავლენით დეფექტების, რელაქსაციური და ჰისტერეზისული შინაგანი ხახუნის სპექტრების, დინამიური და სტატიკური მიკროსისალისა და დრეკადობის მოდულის ცვლილებათა კანონზომიერების დადგენა. დასახული მიზნის მისაღწევად ნაშრომში გადაჭრილია შემდეგი

ამოცანები:

— გერმანიუმის სხვადასხვა პროცენტული შემცველობის ბორითა და ფოსფორით ლეგირებული სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მასიური კრისტალების ფუძემშრეების მეტალოგრაფიული კვლევა;

— სხვადასხვა ხარისხით მექანიკურად დამუშავებული და პოლირებული, თერმულად მომწვარი, მაღალენერგეტიკული ელექტრონებითა და არგონის იონებით დასხივებული p - ტიპის სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძემშრეების შინაგანი ხახუნისა და დინამიური ძვრის მოდულის ტემპერატურული და ამპლიტუდური დამოკიდებულების კვლევა;

— ინდენტორის დატვირთვის ფართო დიაპაზონში მიკროსისალესა და დრეკადობის მოდულზე ბორისა და გერმანიუმის ატომური კონცენტრაციის, პოლირების ხარისხის, თერმული მოწვის, მაღალი

ენერგიის ელექტრონებითა და არგონის იონებით დასხივების გავლენის კვლევა;

— ფოსფორის მაღალტემპერატურული დიფუზიით p - ტიპის სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძემდებლებზე p-n გადასასვლელების ფორმირება და ინფრაწითელი გამოსხივების ახლო დიაპაზონში(0,5-5,0 მკმ) ფოტო ე.მ.დ. სპექტრების კვლევა.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

- p-ტიპის სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძემდებზე დაფენილი ფოსფორსილიკატური ემულსიიდან მაღალტემპერატურული დიფუზიით ფორმირებულია p-n გადასასვლელები და გამოკვლეულია ინფრაწითელი გამოსხივების ახლო არეში ფოტომგრძნობიარობის სპექტრები. მაღალი ენერგიის ელექტრონებითა და არგონის იონებით დასხივებულ p-n გადასასვლელის ფოტომგრძნობიარობის სპექტრში ტალღის სიგრძის 2,0-2,4 მკმ არეში გამოვლენილია 400°C ტემპერატურამდე თერმულად მდგრადი მაქსიმუმი.
- განსაზღვრულია მალეგირებელი ბორისა და გერმანიუმის სხვადასხვა პროცენტული შედგენილობის სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების რელაქსაციური და ჰისტერეზისული შინაგანი ხახუნისა და მიკროპლასტიკურობის მახასიათებლები, გაანალიზებულია დისლოკაციების წვლილი დინამიური ძვრის მოდულის ანომალურ ტემპერატურულ ცვლილებაში.
- დადგენილია გერმანიუმის კონცენტრაციის, ზედაპირის დამუშავების, თერმული მოწვის, ელექტრონებითა და არგონის იონებით დასხივების გავლენით სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძემდებებისა და p-n სტრუქტურების მიკროსისალისა და დრეკადობის მოდულის ცვლილებათა კანონზომიერებანი. გაანალიზებულია თერმული და რადიაციული დეფექტების წვლილი

მექანიკური მახასიათებლების არამონოტონურ ცვლილებაში 220-260°C ტემპერატურულ ინტერვალში.

ნაშრომში წარმოდგენილი კვლევის შედეგების პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს შემდეგში:

- გარეშე ფაქტორებით (მექანიკური დამუშავება და პოლირება, თერმული მოწვა, ელექტრონებითა და არგონის იონებით დასხივება) განპირობებული p -ტიპის სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების სტრუქტურული დეფექტების, ელექტროფიზიკური და მექანიკური თვისებების ცვლილების დადგენილი კანონზომიერებანი შესაძლებელია გამოყენებული იქნას სხვადასხვა დანიშნულების ეპიტაქსიური სტრუქტურებისათვის მართვადი მახასიათებლების რადიაციულად მდგრადი p- და n- ტიპის სილიციუმ-გერმანიუმის ფუძემოყენების შესაქმნელად.
- ტემპერატურისა და გრეხითი დეფორმაციის ამპლიტუდის ფართო დიაპაზონში რელაქსაციური და ჰისტერეზისული შინაგანი ხახუნის პროცესის მახასიათებლების განსაზღვრული მნიშვნელობები სასარგებლოა სილიციუმ-გერმანიუმის მასიური კრისტალების მექანიკური დამუშავებისადმი მედეგობისა და პროფილირებული ნაკეთობების შექმნის გამოსავლიანობის ასამაღლებლად.
- სილიციუმ-გერმანიუმის შენადნობების მასიური კრისტალებისა და მათ ფუძეზე ფორმირებული p-n სტრუქტურების სტრუქტურული დეფექტების, მექანიკური და ელექტროფიზიკური და ოპტიკური თვისებების კომპლექსური კვლევის შედეგები წარმოადგენს საცნობარო მასალას სილიციუმის ფუძეზე ახალი ნახევარგამტარული მასალებისა და სტრუქტურების შექმნის პრობლემისათვის: შედგენილობის, თერმული, მექანიკური და რადიაციული ზემოქმედებით მახასიათებლების ცვლილებების დადგენილი კანონზომიერებები შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას ახალი

თაობის თერმულად და რადიაციულად მდგრადი მაღალეფექტური ფოტოელექტრული ხელსაწყოების შესაქმნელად.

დასაცავად გამოტანილია შემდეგი დებულებები:

- გერმანიუმით, ბორითა და ფოსფორით ლეგირების გავლენა მონოკრისტალური Si-Ge შენადნობების რელაქსაციური და ჰისტერეზისული შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიური მოდულის ტემპერატურულ ცვლილებებზე;
- გერმანიუმით, ბორითა და ფოსფორით ლეგირების, თერმული მოწვებისა და დეფორმაციის გავლენით დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების მოძრაობის აქტივაციური მახასიათებლების ცვლილებათა კანონზომიერებანი.
- გერმანიუმის პროცენტული შემცველობის, პოლირების ხარისხის, მაღალენერგეტიკული ელექტრონებითა და არგონის იონებით დასხივების, თერმული მოწვის გავლენით დინამიური მიკროსისალისა და დრეკადობის მოდულის ცვლილებათა კანონზომიერებანი.
- (111) ორიენტაციის მონოკრისტალურ p-ტიპის Si-Ge ფუძემდებლებზე შექმნილი p-n სტრუქტურების ინფრაწითელი გამოსხივების ახლო დიაპაზონში ფოტომგრძნობიარობის კვლევის შედეგები.

ნაშრომის აპრობაცია. ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებულია სტუ-ს ფიზიკის დეპარტამენტისა და ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სამეცნიერო სემინარების სხდომებზე.

დისერტაციის შინაარსი და ძირითადი შედეგები მოხსენების სახით წარდგენილია საერთაშორისო კონფერენციებსა და სიმპოზიუმებზე:

1. XX საერთაშორისო კონფერენცია “რადიაციული მოვლენების ფიზიკა და რადიაციული მასალათმცოდნეობა“, ალუმტა, ყირიმი, 10-15 სექტემბერი, 2012.
2. XVI საერთაშორისო სიმპოზიუმი “მოწესრიგება მინერალებსა და შენადნობებში“. OMA-16, დონის როსტოვი-ტუაფსე, რუსეთი, 12-17 სექტემბერი, 2013.
3. მსოფლიო კონგრესი “თანამედროვე მასალები“. იზმირი, თურქეთი, 16-19 სექტემბერი, 2013.
4. საერთაშორისო კონფერენცია “თბილისის გაზაფხული 2014“. ბირთვული რადიაციის ნანოსენსორები და ნანოსენსორული სისტემები. თბილისი, საქართველო, 2014.

პუბლიკაციები: დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 8 სამეცნიერო ნაშრომში. ძირითადი პუბლიკაციების ნუსხა მოყვანილია ავტორეფერატის ბოლოში.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა: დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 149 ნაბეჭდ გვერდს. დისერტაცია შედგება რეზიუმესაგან (ორ ენაზე), სარჩევის, შესავლის, ორი თავის, ილუსტრაციის სახით მოყვანილი 32 ნახაზის, 13 ცხრილის, დასკვნისა და 150 დასახელების ლიტერატურისაგან.

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში მოცემულია ნაშრომის ზოგადი დახასიათება, ნაჩვენებია თემის აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია ნაშრომის მიზანი, მისი მეცნიერული სიახლე და პრაქტიკული ღირებულება, დასახულია კვლევის ამოცანები.

პირველ თავში წარმოდგენილია Si-Ge შენადნობების სტრუქტურის, დამახასიათებელი სტრუქტურული დეფექტების მოძრაობის მახასიათებლებისა და სტრუქტურულად-მგრძნობიარე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ურთიერთკორელაციური კავშირების კვლევის შედეგების ლიტერატურული მიმოხილვა. გაანალიზებულია ნახევარგამტარული Si-Ge შენადნობების მასიური კრისტალების

თანამედროვე ნახევარგამტარული ხელსაწყოთმშენებლობაში გამოყენების პერსპექტივები.

შესწავლილია ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული Si-Ge შენადნობების მასიური კრისტალების მექანიკური სიმტკიცე და დისლოკაციების სიჩქარე. Si-Ge შენადნობებში, $0,004 < x < 0,08$ კომპოზიციური დიაპაზონში დისლოკაციების სიჩქარე მონოტონურად მცირდება სილიციუმის შემცველობის ზრდასთან ერთად $450-700^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში $3-24\text{მპა}$ დაბვის ქვეშ. დისლოკაციების სიჩქარე რაოდენობრივად შეფასებულია როგორც დაბვისა და ტემპერატურის ფუნქცია. დაბვა-დეფორმაციის დამოკიდებულება SiGe შენადნობებისთვის $0 < x < 0,4$ კომპოზიციურ დიაპაზონში გერმანიუმის მსგავსია 600°C ტემპერატურაზე ქვემოთ. მიუხედავად ამისა დენადობის დაბვა ტემპერატურის მიმართ არამგრძობიარეა და იზრდება სილიციუმის შემცველობის ზრდასთან ერთად. დაბვა-დეფორმაციის დამოკიდებულება SiGe შენადნობებისთვის $0,95 < x < 1$ კომპოზიციურ დიაპაზონში სილიციუმის მსგავსია $800-1000^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურებზე. დენადობის დაბვა SiGe შენადნობებში დამოკიდებულია შედგენილობაზე, არის პროპორციული $x(1-x)$, მაქსიმალურია $x \approx 0,5$ -ის მახლობლობაში.

Si-Ge შენადნობებს ახასიათებთ უნიკალური თვისებებები, როგორცაა ატომთაშორისი ბმების გარდაქმნებისადმი მიდრეკილება, გერმანიუმის კონცენტრაციის ვარიაციით, ელექტრონებისა და ხვრელების ძვრადობის, სითბოგამტარობისა და ჟანგბადის მდგომარეობის სპეციფიკური ცვლილებები. აღსანიშნავია, რომ SiGe შენადნობი ხასიათდება ტიპური მოუწესრიგებელი სტრუქტურით, რომელშიაც ბმის სიგრძეები და ბმის კუთხეები შედგენილობის გავლენით დამახინჯებულია.

შესწავლილია 800°C ტემპერატურაზე 60° -იანი დისლოკაციების სიჩქარეების დამოკიდებულება ძვრის დაბვაზე 30მპა დაბვამდე ზონური დნობით მიღებულ SiGe შენადნობებში $0,922 < x < 1$ კომპოზიციურ დიაპაზონში სუფთა სილიციუმთან ერთად. დისლოკაციების სიჩქარის

ლოგარითმი არის სწორხაზოვანი ძაბვის ლოგარითმის მიმართ 750-850°C ტემპერატურებზე. ძაბვის დისლოკაციების სიჩქარეზე დამოკიდებულების გრაფიკის დახრილობა SiGe შენადნობებში როცა $x=0.996$ არის დაახლოებით იგივე როგორც სილიციუმში.

სილიციუმით მდიდარი $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ შენადნობების ძაბვა-დეფორმაციის დიაგრამა $0.95 < x < 1$ კომპოზიციურ დიაპაზონში არალეგირებული სილიციუმის ანალოგიურია 800-1000°C ტემპერატურებზე. ის ხასიათდება ძაბვის ვარდნით, რომელიც მოჰყვება ძაბვის ზრდას. ძაბვის ასეთი ვარდნა შეიმჩნევა სხვა ნახევარგამტარებშიც, როგორცაა Si, Ge და GaAs შედარებით დაბალ ტემპერატურებზე. ზედა და ქვედა დენადობის ძაბვები იზრდება სილიციუმის პროცენტული ემცველობის შემცირებით.

განსაზღვრულია SiGe შენადნობების მიკროსისალე მიკროინდენტრებით 0.5N დატვირთვის დროს 10 წმ-ის განმავლობაში ოთახის, 600 და 900 °C ტემპერატურებზე. მიკროსისალე ოთახის და 600°C ტემპერატურებზე იზრდება წრფივად სილიციუმის შემცველობის ზრდასთან ერთად 0-დან 1-მდე, მაშინ როცა 900°C ტემპერატურაზე ის აღწევს მაქსიმუმს $x=0,5$ -ის მახლობლობაში ზემოთ აღნიშნული დენადობის ძაბვის მასგავსად.

$\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ კომპოზიციები ავლენენ შენადნობებისათვის დამახასიათებელ თვისებებს საგრძნობლად მაღალ ტემპერატურებზე. ეს გამომდინარეობს ისეთი ფაქტიდან როგორცაა მიკროსისალის დამოუკიდებლობა ოთახის ტემპერატურაზე შენადნობის ეფექტისაგან, მაგრამ 900°C ტემპერატურაზე ეს განსხვავება ნათლად ვლინდება. იზოლირებული დისლოკაციების სიჩქარე განზავებულ $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ შენადნობებში ახლოს არის სილიციუმისა და გერმანიუმის ანალოგიურ მახასიათებლებთან.

დღემდე მეტად სუსტადაა შესწავლილი გერმანიუმის გავლენა სილიციუმის მექანიკურ თვისებებზე. მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული კვლევით დადგენილია ინდენტრების პროცესში ვიკერსის ინდენტორის ქვეშ ფაზური გარდაქმნები სილიციუმის კრისტალურ მესერში, მოსალოდნელია ასევე ამორფიზაცია. ამორფული სილიციუმი ინერგება

ღრმად დისლოცირებული სილიციუმის კრისტალში, რის შემდეგ დისლოკაციები იწყებენ მოძრაობასა და ავითარებენ მაღალ დაბეჭვს. ინდენტირების პროცესში გერმანიუმი კონცენტრაციით 10^{18}სმ^{-3} წარმოადგენს ქვედა ზღვარს მექანიკურ თვისებებზე გავლენის გამომჟღავნებისთვის. გერმანიუმით ლეგირების პროცესში ფორმირდება კუმშვის დეფორმაციის ველი. დეფორმაციის ველი ამუხრუჭებს დისლოკაციების მოძრაობას, წარმოქმნის ბარიერს ურთიერთმოქმედ დისლოკაციებსა და მინარევებით დისპერგირებულ მატრიცას შორის. გერმანიუმის ატომები ასოცირდებიან ზოგიერთ წერტილოვან დეფექტთან.

გერმანიუმით ლეგირება განაპირობებს მეტად მცირე ზომის პრეციპიტატების წარმოქმნას, რომლებიც განლაგდებიან დისლოკაციებთან, ამუხრუჭებენ ახალი დისლოკაციების ჩასახვას, ეფექტურად ამცირებენ მიკრობზარებისა და არსებული დისლოკაციების გადაადგილებას. ყოველივე აღნიშნული აისახება Si-Ge ფუძემრეების რღვევის სიმტკიცის ამაღლებაში.

დადგენილია, რომ გერმანიუმის ატომები Si-Ge შენადნობების კრისტალურ მესერში ამცირებენ დისლოკაციების სიჩქარესა და მათ გადაადგილებას შედარებით დიდ მანძილზე, აუმჯობესებენ ფუძემრეების ფორმის ცვლილებას (გამრუდებას) ნახევარგამტარული ხელსაწყობის დამზადების ტექნოლოგიურ პროცესში.

ექსპერიმენტულად დადგენილია, რომ ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული სილიციუმის მექანიკური სიმტკიცე სუსტად იზრდება ჟანგბადის კონცენტრაციის გაზრდით $1,3 \cdot 10^{18}\text{სმ}^{-3}$ -დან $1,9 \cdot 10^{18}\text{სმ}^{-3}$ -მდე. გერმანიუმით ლეგირება $3 \cdot 10^{20}\text{სმ}^{-3}$ მდე არ აუმჯობესებს Si-Ge ეპიტაქსიური ფენის მექანიკურ სიმტკიცეს. მისი საგრძნობი ამაღლება იწყება გერმანიუმის $6 \cdot 10^{19}\text{სმ}^{-3}$ კონცენტრაციიდან.

შესწავლილია სილიციუმის ფუძემრეებზე ფორმირებული SiGe ეპიტაქსიური ფენებისა და მასიური $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x < 0,1$) კრისტალების დინამიური მიკროსისალე და ინდენტირების მოდული დატვირთვების

ფართო დიაპაზონში. გაანალიზებულია ინდენტრეზით გამოწვეული დრეკად-პლასტიკური რელაქსაციისა და კომპონენტების დიფუზიის მექანიზმები.

ინდენტორის ზემოქმედებით განხორციელებული ფაზური გარდაქმნა: ალმასის კუბური ფაზა-β-კალას მოდიფიკაცია მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ინდენტრეზის მოდულზე. დატვირთვისაგან განთავისუფლების შემდეგ იწყება შექცევადი ფაზური გარდაქმნა მეტალურიდან ამორფულ სტრუქტურაში.

მესრის პარამეტრებს შორის არსებული სხვაობა Si და Si-Ge სტრუქტურებს შორის მნიშვნელოვანი ხდება სქელი SiGe ეპიტაქსიური ფენებისათვის, რადგანაც მათში ხორციელდება კრისტალური სტრუქტურის რელაქსაცია. რელაქსაცია წარმოქმნის დიდი რაოდენობის შეუთავსებლობის დისლოკაციებს რელიეფური დეფორმაციის გავლენით. ამის თავიდან აცილებისათვის ხშირ შემთხვევაში ფუძემრეებზე თავდაპირველად აფენენ ე.წ. ბუფერულ ფენას.

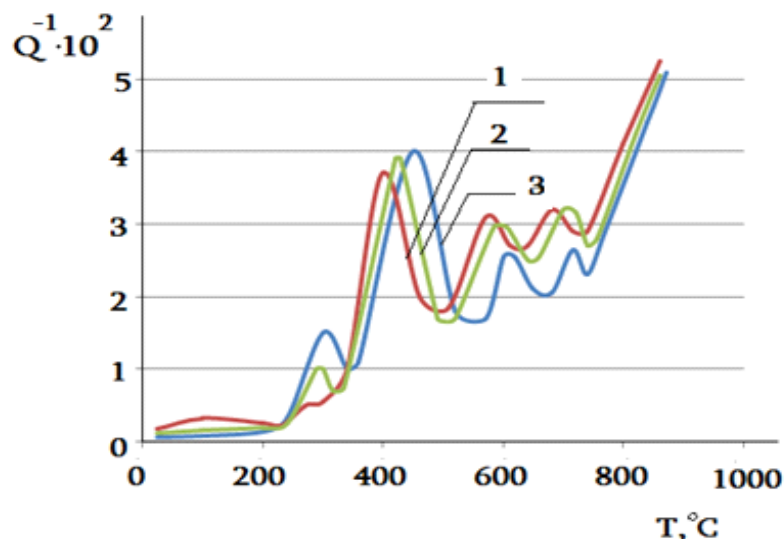
განსხვავებული მდგომარეობაა Si:Ge-ში. ერთის მხრივ, გერმანიუმი სილიციუმთან შედარებით თავისი დიდი კოვალენტური რადიუსის გამო ამცირებს ფრენკელის წყვილების წარმოქმნის ენტალპიას, რაც თავისთავად იწვევს რადიაციული დეფექტების კონცენტრაციის გაზრდას (მაგ. ვაკანსიების), მეორეს მხრივ, Si:Ge-ში შეიძლება მიმდინარეობდეს ე.წ. შინაგანი გეტერირების პროცესი და გერმანიუმთან რადიაციული დეფექტების კომპლექსების წარმოქმნის პროცესი.

მაღალი ენერგიის ელექტრონებით დასხივებულ მონოკრისტალურ Si:Ge-ში მეორადი დეფექტების წარმოქმნა მიმდინარეობს არალეგირებულ სილიციუმისაგან განსხვავებულად. ნაჩვენებია, რომ მონოკრისტალურ სილიციუმში გერმანიუმის დამატება ($N_{Ge} = 10^{20} \text{ სმ}^{-2}$) რამდენადმე ამცირებს რადიაციისადმი მედეგობას და მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს მოწვის შემდეგ დასხივებული მასალის დენის არაძირითადი მატარებლების სიციცხლის ხანგრძლივობის აღგენას.

მეორე თავში წარმოდგენილია კვლევის მეთოდები, ექსპერიმენტული შედეგები და მათი განსჯა. მონოკრისტალური Si-Ge შენადნობები მიღებულია ჩოხრალსკის მეთოდით. კრისტალების ზრდის მიმართულება - [111], დიამეტრი 30-35მმ, სიგრძე- 70-80მმ. დნობები შესრულებულია არგონის ატმოსფეროში. მიკროსტრუქტურა შესწავლილია ოპტიკური მიკროსკოპით NMM-800RT/TRF. წარმოდგენილია ალმასის დისკზე ჭრით, ხეხვითა და პოლირებით ფუძეშრების დამზადების, მათზე მაღალტემპერატურული დიფუზიით p-n გადასასვლელების და მეტალური კონტაქტების შექმნის მეთოდები; გაანალიზებულია გრებიითი რხევების 0,5-5,0ჰც დიაპაზონში შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ტემპერატურული და ამპლიტუდური დამოკიდებულებების ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდის შესაძლებლობანი, დაწვრილებით გაანალიზებულია Dynamic Ultra Micro hardness Tester DUH-2011S ტესტერზე დინამიური და სტატიკური მიკროსისალისა და ინდენტორების მოდულის კვლევის მეთოდი ბერკოვიჩის, კნუპისა და ვიკერსის ინდენტორების დატვირთვის ფართო დიაპაზონში. წარმოდგენილია ინფრაწითელი ტალღებისმშთანთქმის ახლო დიაპაზონში Si-Ge ფუძეშრებზე შექმნილი p-n სტრუქტურების ფოტომგრძნობიარობის კვლევის მეთოდიკა მოდერნიზებულ მონოქრომატორზე MDP-23.

მონოკრისტალური Si-Ge შენადნობების მიკროსტრუქტურაში (111) ორიენტაციის სიბრტყეებზე გამოვლენილია ქაოსურად განაწილებული დისლოკაციები. მათი სიმკვრივე იზრდება $10^3-5 \cdot 10^4$ სმ^{-2} ინტერვალში გერმანიუმის კონცენტრაციის ამაღლებით 2ატ%-მდე. გერმანიუმის მაღალი პროცენტული შედგენილობის Si-Ge ფუძეშრების მიკროსტრუქტურაში იზრდება დისლოკაციების განაწილების არაერთგვაროვნება.

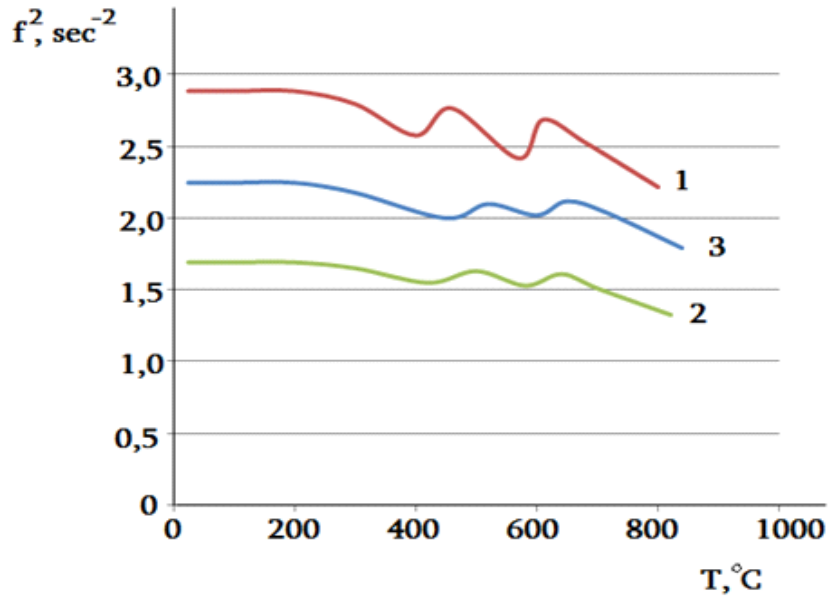
შესწავლილია Si+2ატ%Ge მონოკრისტალის შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრი გრებიითი რხევების 1ჰც სიხშირეზე (ნახ. 1).



ნახ.1. მონოკრისტალური Si+2ატ%Ge შენადნობის შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრები 1. _ საწყისი მდგომარეობა, $f_0=1,73\text{ც.}$, 2.- მოწვა, 800°C , 3სთ. $f_0=1,33\text{ც.}$, 3.- მოწვა, 1000°C , 2სთ. $f_0=1,53\text{ც.}$

ტემპერატურის $20-800^\circ\text{C}$ ინტერვალში შინაგანი ხახუნის ექსპონენციალურ ფონზე $300-320$, $420-450$, $550-600$ და 700°C ტემპერატურებზე გამოვლენილია ინტენსიური მაქსიმუმები. 53ც. -მდე სიხშირის ამაღლება იწვევს მაქსიმუმების წანაცვლებას მაღალი ტემპერატურებისკენ. ეს ადასტურებს მათ რელაქსაციურ ბუნებას.

$300-320$, 450 და 650°C ტემპერატურების არეში ადგილი აქვს ძვრის მოდულის დეფექტსა და ანომალურ ზრდას. ძვრის მოდულის დეფექტი განპირობებულია მიმდინარე რელაქსაციური პროცესით, ხოლო მისი მოსაზღვრე მოდულის ანომალური ზრდა ფაზური გარდაქმნის ტიპის პროცესებით არის განსაზღვრული(ნახ.2).



ნახ.2. მონოკრისტალური Si+2ატ.%Ge შენადნობის ძვრის მოდულის ტემპერატურული სპექტრები 1. _ საწყისი მდგომარეობა, $f_0=1,7$ ჰც., 2.- მოწვა 800°C , 3 სთ., $f_0=1,3$ ჰც. 3.- მოწვა 1000°C , 2 სთ., $f_0=1,5$ ჰც.

კრიტიკულ ტემპერატურებზე შინაგანი ხახუნის მაქსიმუმების რელაქსაციური მდგენელების აქტივაციის ენერჯის მნიშვნელობები განაწილებულია 1,0-2,5ევ დიაპაზონში, მათი შესაბამისი სიხშირის ფაქტორის სიდიდეები შედარებით მაღალია და იცვლება $1 \cdot 10^{11}$ - $5 \cdot 10^{14}$ წმ⁻¹ ინტერვალში.

რელაქსაციური პროცესების ინტენსივობა ავლენს რხევის ამპლიტუდისაგან ძლიერ დამოკიდებულებას, რაც დისლოკაციებისა და წერტილოვანი დეფექტების ურთიერთქმედებით არის განპირობებული. თერმული მოწვით მათი ურთიერთქმედება შესაძლებელია გაძლიერდეს. ამის შედეგად შეიზღუდება დისლოკაციის მოძრაობა და შემცირდება დისლოკაციური წარმოშობის რელაქსაციური პროცესის ინტენსივობა. 800°C -ზე მოწვა ამცირებს ძვრის მოდულის დეფექტსა და ანომალური ზრდის ტემპერატურული ინტერვალის სიგრძეს. მოდულის რთული ხასიათის ცვლილება დაკავშირებულია კრისტალის სტრუქტურაში მიმდინარე რელაქსაციური და ჰისტერეზისული ტიპის პროცესებთან.

მონოკრისტალური $\text{Si}+2\text{ატ.}\% \text{Ge}$ შენადნობის საწყის მდგომარეობაში ეტალონთან შედარების მეთოდით სხვადასხვა ტემპერატურაზე განსაზღვრულია ძვრის მოდულის აბსოლუტური მნიშვნელობები.

შესწავლილია ბორით ლეგირებული მონოკრისტალური $\text{Si}+1.5\text{ატ.}\% \text{Ge}$ -ის შენადნობის შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიური მოდულის ტემპერატურული დამოკიდებულება. შინაგანი ხახუნის ტემპერატურულ სპექტრში 100, 220, 460, 600, 720 და 800°C ტემპერატურებზე გამოვლენილია მაქსიმუმები. ისინი შეთავსებულია შინაგანი ხახუნის ექსპონენციალურად მზარდ ფონთან. ძვრის მოდულის ტემპერატურულ სპექტრში გამოვლენილია რელაქსაციური პროცესებისათვის დამახასიათებელი მოდულის ვარდნა, ე.წ. ძვრის მოდულის დეფექტი. ის დიდია მაღალი ინტენსივობის მაქსიმუმების არეებში. ნაჩვენებია, რომ არალეგირებულ მონოკრისტალურ $\text{Si}+1.5\text{ატ.}\% \text{Ge}$ შენადნობის მოდულის მნიშვნელობები მაღალია და თერმული მოწვის შემდეგ ფიქსირებულია მისი ზრდის ტენდენცია $20-800^{\circ}\text{C}$ ინტერვალში. ბორის კონცენტრაცია - $2 \cdot 10^{17} \text{სმ}^{-3}$ არასაკმარისია 10^4-10^5სმ^{-2} სიმკრივის დისლოკაციების შემცველ კრისტალში გაწყვეტილი ელექტრონული ბმების გაჯერებისათვის. ამის გამო ბორით სუსტად ლეგირებულ შენადნობებში დისლოკაციები ხასიათდებიან ძლიერი ელექტრონული ბმებით. ბორის ატომებთან ლოკალიზებული დეფორმაციული ველები დისლოკაციების ატმოსფეროში ეფექტურად ამუხრუჭებენ დისლოკაციას. ეს გარემოება განსაზღვრავს მოდულის ზრდას.

ბორით ძლიერად ლეგირებული მონოკრისტალური $\text{Si}+1.5\text{ატ.}\% \text{Ge}$ შენადნობის ძვრის მოდულის აბსოლუტური სიდიდე შემცირებულია არალეგირებულ და ბორით სუსტად ლეგირებულ $\text{Si}+1.5\text{ატ.}\% \text{Ge}$ -ის შენადნობთან შედარებით. მკვეთრად არის გამოვლენილი მოდულის დეფექტი და ანომალური ამაღლება რელაქსაციური პროცესების ტემპერატურების არეებში. ბორით ლეგირება ქმნის დეფექტების ახალ ენერგეტიკულ მდგომარეობებს და განაპირობებს მოდულის ანომალიებს

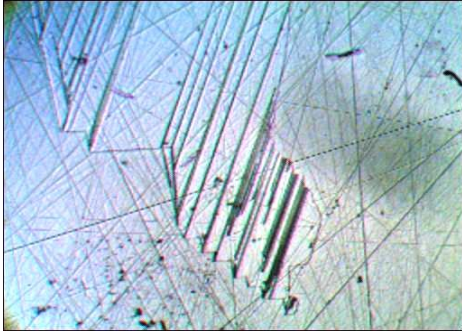
შედარებით დაბალ ტემპერატურებზე. მოდულის ვარდნისა და ამალღების ტემპერატურები ასევე მცირდება ამპლიტუდური დეფორმაციის გაზრდით.

შესწავლილია მონოკრისტალური Si+2ატ.%Ge:P შენადნობის შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ტემპერატურული სპექტრები. საცდელი ნიმუშები ორიენტირებულია [111] მიმართულებით. დისლოკაციების სიმკვრივე $5 \cdot 10^4 \text{სმ}^{-2}$ -ია, ხოლო დენის მატარებლების კონცენტრაცია შეადგენს $1 \cdot 10^{15} \text{სმ}^{-3}$ და $5 \cdot 10^{18} \text{სმ}^{-3}$.

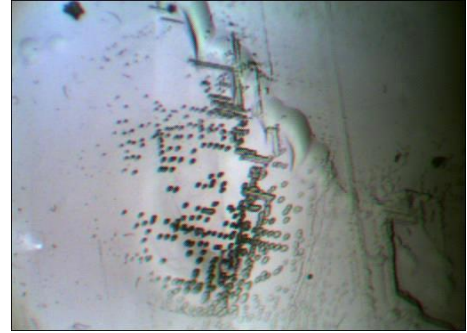
შინაგანი ხახუნის რელაქსაციური მაქსიმუმები(80, 150, 280, 450, 620 და 710°C) ხასიათდებიან აქტივაციის ენერჯის მნიშვნელობებით: 0,90; 1,30; 1,45; 1,65; 1,85 და 2, 60 ევ. რელაქსაციური პროცესების სიხშირის ფაქტორების მნიშვნელობები განაწილებულია 10^{11} - 10^{14}წმ^{-1} ინტერვალში. დადგინდა, რომ ფოსფორით ლეგირება 10-15%-ით ამცირებს აქტივაციურ მახასიათებლებს.

ნახევარგამტარი მასალების მასიური კრისტალების განსაზღვრული ფორმისა და ზომების ნიმუშების მომზადება (ჭრა, ხეხვა, პოლირება, მოწამვლა და ა.შ) იწვევს მათი ზედაპირული ფენების ძლიერ დეფორმაციას, რომელიც 10-50მკმ სიღრმემდე ვრცელდება.

წარმოდგენილია ჩოხრალსკის მეთოდით მიღებული მონოკრისტალური Si-Ge შენადნობების სხვადასხვა ხარისხით პოლირებული ფუძეშრების მიკროსტრუქტურისა და ძვრის დინამიური მოდულის კვლევის შედეგები. (111) ორიენტაციის ნიმუშების მიკროსტრუქტურაში გამოვლენილია არათანაბრად განაწილებული სხვადასხვა ზომის მოწამვლის ფიგურები. მათი უმრავლესობა დისლოკაციური წარმოშობისაა. სტრუქტურაში შეინიშნება ჯგუფებში გაერთიანებული ორეულები (ნახ.3).



ა x400



ბ x400

ნახ.3. Si+2%Ge შენადნობის მიკროსტრუქტურა. ა.- პარალელურად ორიენტირებული ორეულები, ბ.- დეფორმაციის ხაზების გასწვრივ განაწილებული წერტილოვანი დეფექტები

ორეულების გასწვრივ გამოვლენილია მწკრივებში და უწყსრიგოდ განაწილებული მოწამვლის ფიგურები. მაღალი კონცენტრაციის დეფექტების არათანაბარი განაწილება ფორმირებულია კრისტალიზაციის პროცესში ინტენსიური თერმული ძაბვების ზემოქმედების პირობებში.

პოლირებული ნიმუშების ძვრის მოდული ამაღლებულია. მისი მნიშვნელობა იზრდება პოლირების სიწმინდის გაზრდით. მაღალი სიწმინდით პოლირებული ნიმუშების ზედაპირების ქიმიური დამუშავებით კიდევ უფრო მაღლდება ძვრის მოდულის მნიშვნელობები.

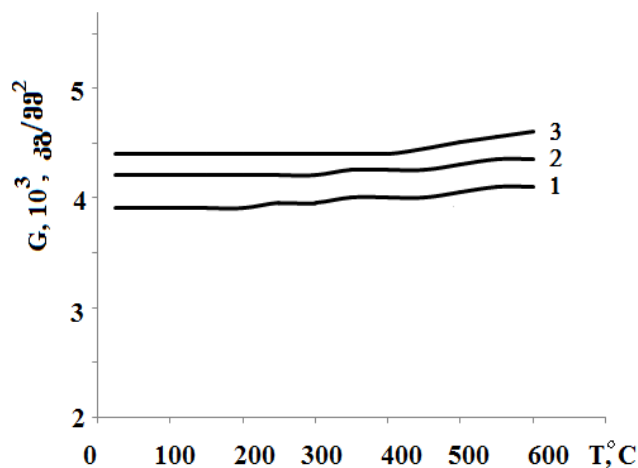
Si+2ატ.%Ge შენადნობის ნიმუშების ზედაპირის დამუშავების გავლენა ძვრის დინამიურ მოდულზე

ცხრილი 1

ნიმუშების ზედაპირების მდგომარეობა	ძვრის მოდული, კგ/მმ ²			
	საწყისი	მომწვარი, 600°C, 2სთ	მომწვარი, 750°C, 2სთ	მომწვარი, 900°C, 2სთ
1 მკმ ალმასის პასტით პოლირებული	3900	4150	4250	4400
0,25მკმ ალმასის პასტით პოლირებული	4200	4500	4600	4700
0,25 მკმ ალმასის პასტითა და ქიმიურად პოლირებული	4400	4500	4700	4900

მაღალ ტემპერატურებზე ვაკუუმში მოწვამ გამოავლინა სხვადასხვა ხარისხით პოლირებული ნიმუშების ძვრის მოდულის ზრდის ტენდენცია. ძვრის მოდულის ამაღლება მკაფიოდ არის წარმოჩენილი 900°C ტემპერატურაზე თერმულად მომწვარ ნიმუშებში. ძვრის მოდულის მაქსიმალური სიდიდით ხასიათდება ქიმიურად პოლირებული ნიმუში, რომელიც წინასწარ 0,25მკმ დისპერსულობის ალმასის პასტით არის მექანიკურად პოლირებული.

შესწავლილია იზოქრონული მოწვის ტემპერატურის გავლენა ძვრის მოდულის სიდიდეზე (ნახ.4). 250-350°C ტემპერატურულ ინტერვალში 1მკმ დისპერსულობის ალმასის პასტით პოლირებულ ნიმუშებს ახასიათებთ ძვრის დინამიური მოდულის ზრდა. მოწვის ტემპერატურის ამაღლება ავლენს ძვრის მოდულის შემცირებას. 0,25მკმ დისპერსულობის ალმასის პასტით პოლირებული ნიმუშების ქიმიური დამუშავება HF+HNO₃ ხსნარში იწვევს ძვრის მოდულის განსხვავებული ხასიათის ტემპერატურულ ცვლილებებს. ამაღლებულ ტემპერატურებზე ძვრის მოდულის ზრდას ენაცვლება ნაჯერობის მდგომარეობა და ამის შემდეგ მისი მნიშვნელობა უცვლელია 550°C ტემპერატურამდე.



ნახ.4. Si+2ატ%Ge შენადნობის ძვრის მოდულის დამოკიდებულება იზოქრონული მოწვის ტემპერატურაზე. 1- 1მკმ დისპერსულობის ალმასის პასტით პოლირებული, 2.- 0,25მკმ დისპერსულობის ალმასის პასტით პოლირებული, 3.-0,25მკმ დისპერსულობის ალმასის პასტითა და ქიმიურად პოლირებული.

შესწავლილია გერმანიუმის გავლენა სხვადასხვა ხარისხით პოლირებული ფუძემშრების ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებზე. მე-2 ცხრილში წარმოდგენილია საცდელი ნიმუშების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების კვლევის შედეგები.

**სხვადასხვა ხარისხით პოლირებული მონოკრისტალური Si-Ge
ფუძემშრების მექანიკური მახასიათებლები**

ცხრილი 2

საცდელი ნიმუშები	დისლოკაციების სიმკვრივე, სმ ⁻²	მაპოლირებელი ალმასის პასტის მარცვლის ზომა, მკმ	შინაგანი ხახუნის ფარდობითი ინტენსივობა, 10 ³	ძვრის მოდული, კგ/მმ ²
Si	2×10 ³	1.0	1.8	4270
		0.5	1.2	4300
		0.25	0.7	4350
Si+0.5ატ.%Ge	5×10 ³	1.0	2.4	4160
		0.5	1.7	4200
		0.25	1.1	4260
Si+1.2ატ.%Ge	1×10 ⁴	1.0	3.0	4000
		0.5	2.2	4040
		0.25	1.5	4150

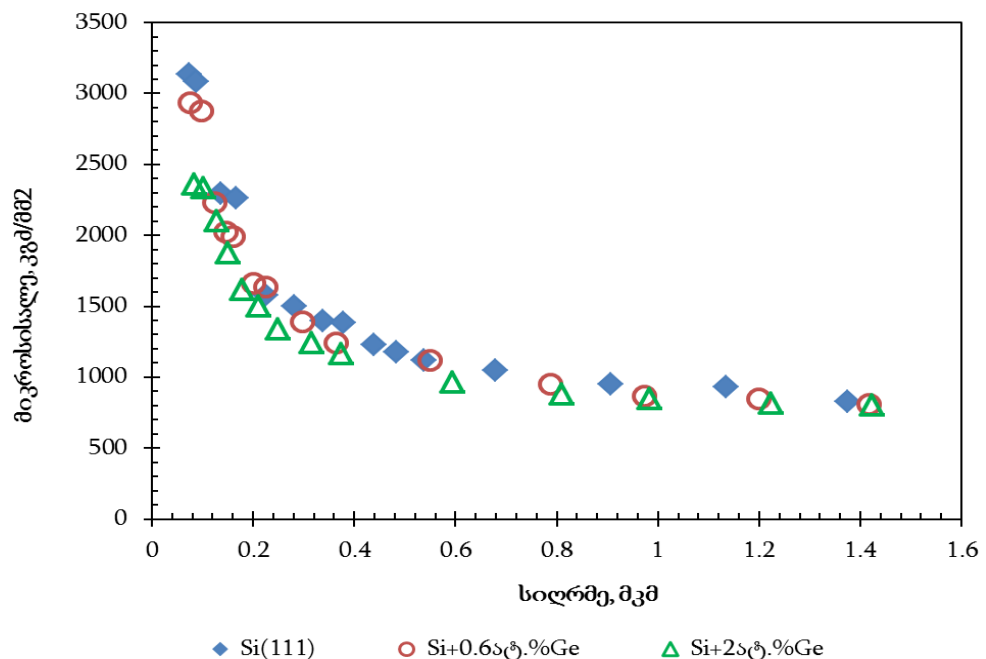
ძვრის დინამიური მოდულის აბსოლუტური სიდიდე იზრდება მექანიკური პოლირების ხარისხის ამალღების პროპორციულად. მისი მნიშვნელობები მაქსიმალურია მაღალი ხარისხით პოლირებულ ნიმუშებში გერმანიუმის კონცენტრაციის გაზრდით ძვრის მოდულის მნიშვნელობები მცირდება, რასაც განაპირობებს შედარებით დიდი კოვალენტური რადიუსის გერმანიუმის ატომების არეში ლოკალიზებული დეფორმაციის ველების ურთიერთგადაფარვა და ატომთაშორისი კავშირის ძალების შესუსტება.

შესწავლილია შინაგანი ხახუნისა და ძვრის დინამიური მოდულის ამპლიტუდური დამოკიდებულება ფართო ტემპერატურისა და დეფორმაციის დიაპაზონებში. მონოკრისტალური Si-Ge შენადნობების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის რხევის ამპლიტუდისაგან დამოკიდებულებები ხასიათდება სამი სტადიით. მცირე ამპლიტუდებზე (5·10⁻⁶-7·10⁻⁴) შინაგანი ხახუნის ინტენსივობა დაბალია და იზრდება სუსტად რხევის ამპლიტუდის პროპორციულად. 7·10⁻⁵ ამპლიტუდურ

დეფორმაციაზე იწყება შინაგანი ხახუნის ინტენსივობის წრფივი ზრდა, რომელიც გრძელდება რხევის ამპლიტუდის $3 \cdot 10^4$ სიდიდემდე. ამპლიტუდის შემდგომი ზრდისას შინაგანი ხახუნი მკვეთრად იზრდება. შინაგანი ხახუნის შეუქცევადი ზრდა ვლინდება მეორე კრიტიკულ ამპლიტუდიდან და ძლიერდება უფრო მაღალ ამპლიტუდაზე. შეუქცევადი ცვლილებები განპირობებულია მიკროპლასტიკური დეფორმაციებით.

შესწავლილია (111) კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის სიბრტყეებზე გერმანიუმის სხვადასხვა პროცენტული შემცველობის Si-Ge ფუძეშრეების სტატიკური და დინამიური მიკროსისალისა და ინდენტირების მოდულის დამოკიდებულება ინდენტორის შეღწევის სიღრმეზე.

ნახ.5-ზე წარმოდგენილია სილიციუმისა და სხვადასხვა პროცენტული შემცველობის Si-Ge ფუძეშრეების (111) კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის ზედაპირების კნუპის სტატიკური მიკროსისალის შეღწევის სიღრმეზე დამოკიდებულება.



ნახ.5. მონოკრისტალური სილიციუმისა და სხვადასხვა შედგენილობის Si-Ge ფუძეშრეების კნუპის სტატიკური მიკროსისალის შეღწევის სიღრმეზე დამოკიდებულება.

როგორც ნახ.5-დან ჩანს აღნიშნული დამოკიდებულება ხასიათდება კნუპის სტატიკური მიკროსისალის მაღალი მაჩვენებლით მცირე

სიღრმეებზე, რომელიც სიღრმის ზრდით მცირდება და პლატოზე გადის, რაც ე.წ. “ინდენტირების ზომითი ეფექტის”(Indentation Size Effect) გამოვლინებას წარმოადგენს. გერმანიუმის პროცენტული შემცველობის ზრდით შეინიშნება სტატიკური მიკროსისალის შემცირება. ორივე მექანიკური მახასიათებელი ზედაპირული ფენების არეში არამონოტონურად იცვლება გამოვლენილია ე.წ. შებრუნებული “ზომითი ეფექტი“.ინდენტორის შეღწევის სიღრმის დიდ მნიშვნელობათა ინტერვალში გამოვლენილია დინამიური მიკროსისალისა და ინდენტირების მოდულის შემცირების ტენდენცია. წარმოდგენილია მექანიკური მახასიათებლების მაქსიმალური მნიშვნელობების და მათი შესაბამისი შეღწევის სიღრმის ცვლილება სხვადასხვა შედგენილობის ფუძემოყდრებისათვის (ცხრ. 3).

ეს გარემოება შესაძლებელია განპირობებულია სტატიკური მიკროსისალის განსაზღვრის მეთოდით. ანაბეჭდის მიღება წარმოადგენს პლასტიკური დეფორმაციისა და დრეკადი აღდგენის უწყვეტ პროცესს. მცირე სიღრმეებზე დრეკადი მდგენელი მეტია პლასტიკურზე, ხოლო დიდ სიღრმეზე, ნიმუშის მოცულობაში, დეფორმაციას ძირითადად პლასტიკური მდგენელი განსაზღვრავს.

**Si-Ge შენადნობების ბერკოვიჩის მიკროსისალისა და ინდენტირების მოდულის
მაქსიმალური მნიშვნელობები**

ცხრილი 3.

ნიმუში	სიღრმე $h_{max}, \mu\text{მ}$	დინამიური მიკროსისალე, გპა	ინდენტირების მოდული, გპა
Si(111):B($2 \cdot 10^{13} \text{სმ}^{-3}$)	0.1309	7.068	164.3
Si+0.5ატ.%Ge:B	0.1757	6.331	141.2
Si+1.2ატ.%Ge:B	0.2296	5.55	125.7
Si+2ატ.%Ge:B	0.232	4.361	85.17

ცხრილიდან ჩანს შებრუნებული “ზომითი ეფექტის“ შემცირების ტენდენცია გერმანიუმის კონცენტრაციის გაზრდით. ის მაქსიმალურია სილიციუმში და მინიმალურია $\text{Si}+2\text{ატ.}\% \text{Ge}$ ფუძემშრეში. აღნიშნულის ერთ-ერთ მიზეზად შესაძლებელია დაშვება, რომ Ge-ის ატომების მახლობლობაში ნაკლები ინტენსივობით მიმდინარეობს ზედაპირზე ფორმირებული დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების ურთიერთბლოკირება. გერმანიუმით ლეგირება ზრდის კოვალენტური კავშირების სიგრძეს მესრის პარამეტრის ზრდის შედეგად. ეს განაპირობებს ატომთაშორისი კავშირების ენერჯისა და შესაბამისად, სტრუქტურულად მგრძობიარე მიკროსისალისა და დრეკადობის მოდულის შემცირებას.

არგონის იონების დასხივებით განპირობებული მიკროსისალისა და ინდენტირების მოდულის ცვლილებათა კანონზომიერებების დადგენისათვის TRIM-2012 პროგრამით განხორციელდა 100 კევ ენერჯის არგონის იონებისა და წარმოქმნილი რადიაციული დეფექტების პარამეტრების გათვლის სამუშაოები. სხვადასხვა ფლუენსებითა და 100 კევ ენერჯის არგონის იონებით დასხივებული $\text{Si}+1.5\text{ატ.}\% \text{Ge}$ -ის ზოგიერთი რადიაციული მახასიათებლის პარამეტრების გაანგარიშება განხორციელდა იონ-ატომური ურთიერთქმედების ბინარული მოდელით დაჯახებათა სრული კასკადის შემთხვევისათვის. წარმოდგენილია Ar-ის იონების განარბენების განაწილება მონოკრისტალური $\text{Si}+1.5\text{ატ.}\% \text{Ge}$ შენადნობის ფუძემშრეში. არგონის იონების საშუალო პროექციული განარბენი $R_p=112.4$ ნმ, ხოლო საშუალო კვადრატული გადახრა $\Delta R_p=26.3$ ნმ. Ar-ის ერთი იონით წარმოქმნილი ვაკანსიების საერთო რაოდენობა შეადგენს 1710-ს, ხოლო სილიციუმისა და გერმანიუმის ვაკანსიების რაოდენობა შესაბამისად ტოლია 1682 და 28-ს. სილიციუმის კვანძებიდან ამოვარდნილი ატომებისა და წარმოქმნილი ვაკანსიების განაწილების მაქსიმუმის საშუალო სიდიდე შესაბამისად შეადგენს 83.3 და 82.6 ნმ. ხოლო კვანძებიდან ამოვარდნილი გერმანიუმის ატომებით წარმოქმნილი ვაკანსიების განაწილების მაქსიმუმის საშუალო სიდიდე შესაბამისად შეადგენს 80.7 და 81.7 ნმ-ს.

განსაზღვრულია Ar-ის იონებისა და პირველადი წანაცვლებული ატომების დაჯახებით განპირობებული სხვადასხვა წარმოშობის ენერგეტიკული დანაკარგები და ასევე Ar-ის იონებით გაფრქვეული Si-ისა და Ge-ის ატომების წილი.(ცხრილი 4 ა,ბ)

არგონის იონების ენერგიის დანაკარგები(ა) და Si-Ge ფუძემშრის ზედაპირიდან გაფრქვეული ატომების წილი(ბ). ცხრილი 4.

ა) ენერგიის დანაკარგები%:			ბ) გაფრქვეული ატომები		
	იონები	წანაცვლ. ატ.		ატომ/იონ	ევ/ატომ
იონიზ.	30,97	27,77	საერთო	1,209	
ვაკანსია	0,17	3,23	Si	1,19	148,3
ფონონი	0,52	37,36	Ge	0,09	913,3

მე-11 ცხრილიდან ჩანს, რომ Ar-ის იონების 31%-მდე იხარჯება Si-ისა და Ge-ის ატომების იონიზაციაზე(არადრეკადი პროცესი), ხოლო Si-ისა Ge-ის ატომების კვანძებიდან ამოტყორცნაზე იკარგება არგონის იონების ენერგიის დაახლოებით 28%. პირველადი წანაცვლებული ატომები ენერგიის დიდ ნაწილს კარგავენ ფონონებზე ე.ი. ენერგიის ეს ნაწილი ხმარდება ფუძემშრის გათბობას. ცხრილიდან ასევე ჩანს, რომ სილიციუმის გაფრქვეული ატომების წილი გაცილებით აღემატება Ge -ის ატომების წილს.

Ar-ის ძირითადი ენერგეტიკული დანაკარგი ხმარდება Si-ის ატომების იონიზაციას. Ge-ის პირველადი წანაცვლებული ატომები ენერგიის დიდ ნაწილს კარგავენ ფონონებზე ე.ი. ენერგიის ეს ნაწილი ხმარდება ფუძემშრის გათბობას.

შესწავლილია სხვადასხვა ფლუენსის Ar-ის იონებით დასხივების გავლენა მონოკრისტალური Si-Ge ფუძემშრეების მიკროსისალესა და დრეკადობის მოდულზე შეღწევის სიღრმის ფართო დიაპაზონში.

ინდენტორის შეღწევის სიღრმეზე დამოკიდებულების გრაფიკებზე გამოვლენილია შებრუნებული “ზომითი ეფექტი“. დასხივების ფლუენსის ამადლება $6 \cdot 10^{11} \text{სმ}^{-2}$ -დან $5.2 \cdot 10^{12} \text{სმ}^{-2}$ -მდე ამცირებს მაქსიმალური დინამიური მიკროსისალის მნიშვნელობას. დასხივების ფლუენსის შემდგომი ამადლება კი იწვევს მიკროსისალის სიდიდის ზრდას და $2.5 \cdot 10^{14} \text{სმ}^{-2}$ ფლუენსზე აჭარბებს დაუსხივებელი ნიმუშის მიკროსისალის საწყის მნიშვნელობას.

100 კეე ენერგიის არგონის იონებით დასხივების გავლენა Si+1.5ატ.%Ge:B($2 \times 10^{13} \text{სმ}^{-3}$) ფუძეშრის მექანიკურ მახასიათებლებზე

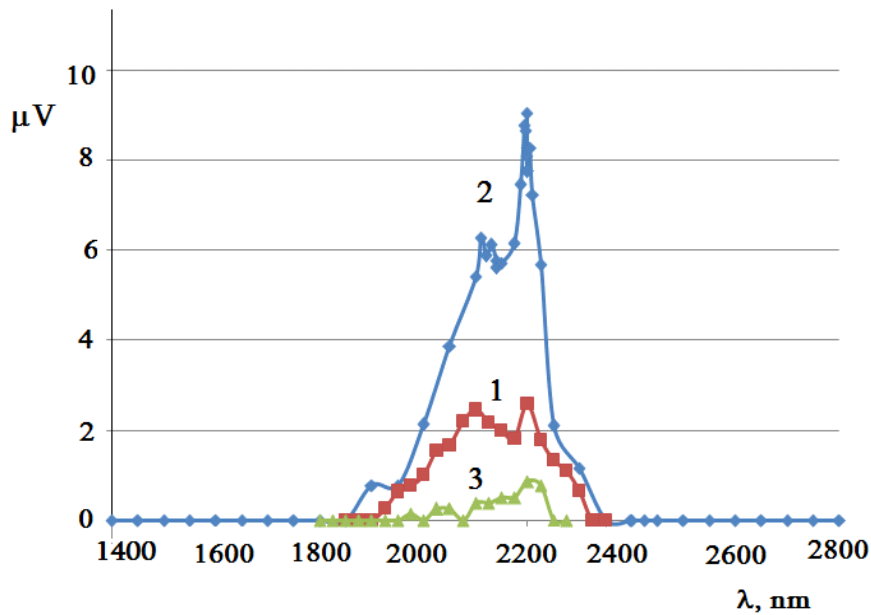
ცხრილი 4

ფლუენსი	h, მკმ	DHV, გპა	Eit, გპა
$6 \times 10^{11} \text{სმ}^{-2}$	0.1668	6.38	144.6
$5 \times 10^{12} \text{სმ}^{-2}$	0.1812	5.674	117.8
$2 \times 10^{13} \text{სმ}^{-2}$	0.2497	6.86	119
$2.5 \times 10^{14} \text{სმ}^{-2}$	0.5053	8.938	184.9
$5 \times 10^{15} \text{სმ}^{-2}$	0.387	8.575	170.4

შესწავლილია 100კეე ენერგიის Ar-ის იონების დასხივების გავლენა (ფლუენსი 10^{13}სმ^{-2}) p-ტიპის Si-Ge ფუძეშრეების მიკროსისალესა და ინდენტორების მოდულზე საწყის და მაღალ ტემპერატურებზე სინათლის მოკლე იმპულსებით სწრაფი თერმული მოწვის შემდეგ. ყველა შემთხვევაში ფიქსირდება მიკროსისალის შეზრუნებული “ზომითი ეფექტი“. არგონით დასხივებული ნიმუშების ფოტონური მოწვის ტემპერატურის ამაღლება ინდენტორის შეღწევის ფართო დიაპაზონში ავლენს მიკროსისალის ზრდის ტენდენციას.

შესწავლილია მაღალი ხარისხით პოლირებული 6 მეე ენერგიის ელექტრონებით დასხივებული p-ტიპის Si-Ge ფუძეშრეებისა და p-n გადასასვლელების მიკროსისალის ცვლილები იზოქრონული მოწვის სხვადასხვა ტემპერატურაზე. კრისტალში შეღწევის მაღალ სიღრმეებზე ჩანს მიკროსისალის ზრდა 260°C ტემპერატურის არეში. მაღალი კონცენტრაციით ფოსფორის შემცველ ზედაპირულ ფენებში ასევე შენარჩუნებულია მიკროსისალის ზრდის ტენდენცია.

მონოკრისტალური Si-Ge:B ფუძეშრეებზე შექმნილი p-n გადასასვლელების ფოტომგრძნობიარობის სპექტრები პრაქტიკული გამოყენებისათვის მეტად საინტერესო ცვლილებებს ავლენენ მაღალენერგეტიკული ელექტრონებით დასხივების შემდეგ(ნახ.6). 6 მეე ენერგიით აჩქარებული ელექტრონების დასხივება ფლუენსით 10^{13}სმ^{-2} განხორციელდა დანადგარზე CLINAC 2100iX.



ნახ.6. Si-Ge ფუძეშრეებზე p-n გადასასვლელების ფოტომგრძნობიარობის სპექტრები

პირველ გრაფიკზე წარმოდგენილია ნმევ ენერგიის ელექტრონებით დასხივებული (ფლუენსია $\approx 10^{13}$ სმ $^{-2}$) p-ტიპის Si+2,0ატ.%Ge:B($5 \cdot 10^{13}$ სმ $^{-3}$) ფუძეშრეზე ფოსფორის დიფუზიით შექმნილი(10^{16} სმ $^{-3}$) p-n გადასასვლელის ფოტომგრძნობიარობის სპექტრი თერმულ დამუშავებამდე. მეორე გრაფიკზე წარმოდგენილია ანალოგიური სპექტრი 380°C ტემპერატურამდე იზოქრონული თერმული ზემოქმედების შემდეგ. მესამე გრაფიკზე წარმოდგენილია ფოტომგრძნობიარობის სპექტრი p-n სტრუქტურისა, რომელიც შექმნილია p- ტიპის Si+1,9% Ge:B (10^{13} სმ $^{-3}$) ფუძეშრის B-ის იონების იმპლანტაციით 10^{15} სმ $^{-3}$ -მდე კონცენტრაციის ამაღლებისა და ამის შემდგომ ფოსფორის მაღალტემპერატურული დიფუზიით (10^{18} სმ $^{-3}$). შედარებითი ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მესამე შემთხვევაში მეტად მცირეა ფოტო ე.მ.ძ.-ის ფარდობითი მნიშვნელობები ტალღის სიგრძის მოცემულ ინტერვალში.

სავარაუდოა, რომ ელექტრონების დასხივებით ფორმირებული მაღალი ინტენსივობის ფოტომგრძნობიარობის ზოლის ფორმირებაში

მონაწილეობენ რადიაციული დეფექტების კომპლექსები, რომლებიც ქმნიან ღრმა ენერგეტიკულ დონეებს Si-Ge შენადნობების აკრძალულ ზონაში.

დასკვნა

- მეტალოგრაფიული კვლევით ნაჩვენებია დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების განაწილების არაერთგვაროვნების ზრდა გერმანიუმისა და ბორის მაღალი ატომური პროცენტული შემცველობის Si-Ge ფუძეშრებში.
- გრებიტი რხევების 0,5-5 μ m სიხშირის დიაპაზონში შესწავლილია მონოკრისტალური Si-Ge შენადნობების შინაგანი ხახუნისა და ძვრის მოდულის ტემპერატურული და ამპლიტუდური დამოკიდებულებები. განსაზღვრულია რელაქსაციურ პროცესებში მონაწილე დისლოკაციური წარმოშობის დეფექტების აქტივაციის ენერჯისა და სიხშირის ფაქტორის სიდიდეები.
- ნაჩვენებია, რომ Si-Ge შენადნობებში გერმანიუმის პროცენტული შემცველობის, მექანიკური პოლირების ხარისხისა და თერმული მოწვის ტემპერატურის გაზრდა ასუსტებს დინამიური ძვრის მოდულის არამონოტონურ ცვლილებებს კრიტიკულ ტემპერატურულ ინტერვალებში.
- TRIM-2012 პროგრამით განსაზღვრულია Si-Ge შენადნობებში არგონის იონების დასხივებით წარმოქმნილი რადიაციული დეფექტების განაწილების პარამეტრები.
- შესწავლილია საწყისი და სხვადასხვა ფლუენსის არგონის იონებით დასხივებული Si-Ge შენადნობების მიკროსისალისა და ინდენტირების მოდულის ცვლილებების კანონზომიერებები ინდენტორზე დატვირთვის 1-1500მნ დიაპაზონში. არგონის იონების ფლუენსის ამაღლება 10^{12} - 10^{14} სმ⁻² დიაპაზონში იწვევს Si-Ge შენადნობების მექანიკურ განმტკიცებას.

- შესწავლილია არგონის იონებით დასხივების ფლუენსის გავლენა Si-Ge შენადნობების ზედაპირულ ფენებში მიკროსისალისა და ინდენტირების მოდულის შებრუნებული ზომითი ეფექტის მახასიათებლებზე.
- როგორც საწყის ასევე არგონის იონებით დასხივებულ Si-Ge შენადნობებში გერმანიუმის პროცენტული შემცველობის გაზრდა იწვევს ზედაპირულ ფენებში მიკროსისალის მაქსიმალური სიდიდის შემცირებასა და ინდენტორის შეღწევის სიღრმის გაზრდას.
- შესწავლილია ინფრაწითელი გამოსხივების ახლო დიაპაზონში Si-Ge ფუძემრეებზე შექმნილი p-n სტრუქტურების ფოტომგრძობიარობის სპექტრები. 6 მევ ენერგიის ელექტრონებით დასხივებულ ნიმუშებში ტალღის სიგრძის 2,0-2,4 მკმ დიაპაზონში გამოვლენილია ურთიერთზედებული ინტენსიური მაქსიმუმები.
- იზოქრონული თერმული მოწვა 400°C ტემპერატურამდე იწვევს ფოტომგრძობიარობის მაქსიმუმის ინტენსივობის მკვეთრ ზრდას, რაც განპირობებულია მაქსიმუმების ფორმირებაში მონაწილე აქტიური ცენტრების კონცენტრაციის გაზრდით.

Resume

Silicon-based modern devices are required high operating velocities with low background of noise, high operating frequencies (>tens GHz), low cost. So there is high interest in silicon bulk crystals and structures doped by isovalent elements, mainly, carbon and germanium. They form elastic deformation fields and change

conditions of point defects generation and motion. Si-Ge alloys in solid states are characterized by complete intersolubility of components. This circumstance causes wide application perspectives of Si-Ge alloys bulk crystals and epitaxial structures in modern semiconducting devices and equipments.

Present work deals with investigations of structural defects, dynamic and static microhardness and elasticity modulus, torsion oscillation damping relaxation and phase transformation type processes, dynamic shear modulus, optical photosensitivity spectra near infrared radiation range of p-n junctions, formed by high-temperature diffusion of monocrystalline $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x \leq 0,02$) alloys with p- and n-types electric conductivity .

Bulk crystals of boron doped Si-Ge alloys with different Ge concentration have been grown by the crystallization-Czochralski method in [111] crystallographic direction.

Contribution of temperature fluctuations on formation of real structural state, characteristic for Si-Ge substrates , in a process of elastic deformation and crystallization, localized in crystalline lattice near dopant impurities (B, Ge) has been discussed.

Electrophysical characteristics of Si-Ge substrates in initial and thermally treated have been determined by Hall effect registration Van der Pauw method at room temperatures.

Contribution of surface and volume structural defects in changing of physical-mechanical characteristics of Si-Ge substrates have been analyzed. Regularities of changing dynamic shear modulus of Si-Ge substrates in a wide range of temperature and amplitude deformation doped by boron and germanium have been studied. Decrease of absolute values of dynamic shear modulus has been revealed by increasing Ge concentration. In temperature increasing conditions , nonmonotonous change of dynamic shear modulus has been shown. Dynamic shear modulus increases by 12-15% in Si-Ge alloys doped by high concentration of boron ($< 10^{15}\text{cm}^{-3}$), but with small concentration of boron ($> 10^{18}\text{cm}^{-3}$) on the contrary, its values decrease. Regularities of changing critical strain amplitude in boron and germanium doped Si-Ge substrates have been established, dislocation mechanisms of deteriorating dynamical strength by thermal treatment at high temperatures have been analyzed. Contribution of point defects and oxygen-containing dispersive phases in dislocation blocking and dynamical strengthening of Si-Ge alloys has been analyzed.

Low frequency (0,5-5,0Hz) internal friction and dynamic shear modulus temperature spectra of monocrystalline $\text{Si}+2\text{at}\%\text{Ge}$ substrate have been studied. Relaxation and hysteretic internal friction processes and modulus defects stipulated by generation, motion and interaction of individual and pair kinks on various dislocations have been revealed. Dynamic strengthening of the structure is revealed in areas of 250-320°C, 450 and 500-550°C temperatures. Mentioned changes are stipulated by diffusion of defects in direction of dislocation cores, resulting in blocking dislocations and increasing the values of dynamic shear modulus, therefore dynamic strengthening of structure takes place. It is

experimentally established, that it is possible to control mechanical properties of Si-Ge alloys by changing boron and germanium concentrations, that is important for yielding of samples and improving mechanical properties.

Studying of changes of static and dynamic microhardness and indentation modulus of Si-Ge substrates doped by germanium and boron has been carried out by Knoop, Berkovich and Vickers methods at the room temperature on dynamic ultra-micro hardness tester DUH-211S. Increasing regularities of static and dynamic microhardness has been established by increasing Ge concentration. Different character of microhardness changes at various velocities of indenter penetration in crystal has been shown. Direct and indirect "Indentation Size Effect" has been revealed in upper layers by the influence of small loadings. It is reflected in increasing and decreasing of microhardness and indentation modulus during penetration of indenter in crystal depth.

It is shown that microhardness and indentation modulus practically slowly decline in a whole range of penetration depth in crystals by deterioration of polishing degree of substrate surface and increase of Ge concentration, that is preferentially stipulated by formation of high mobility defects and elastic deformation fields near of Ge atoms, those weaken inter-atomic bonding forces.

Non-monotonous changes of isochronal annealing temperature dependence of Knoop microhardness of p-type Si-Ge substrates and p-n junctions based on them were revealed in 200-260°C temperature interval. Penetration of indenter in crystal is fixed in upper n-layer in p-n junction, and also in its area and p-type substrate. In all cases, in the abovementioned temperature interval, anomalous changes of microhardness dependence on isochronal annealing temperature has been revealed, that indicates on transformation processes in radiation defects. Based on generalization of the known investigation results of radiation defects formed in Si and Si-Ge alloys crystalline lattice it is real to suppose, that in 200-260°C temperature interval, in isochronal annealing process of Si-Ge substrates, irradiated by electrons, annealing of vacancy-phosphorus, vacancy-oxygen and divacancies is taking place simultaneously. At this stage contribution of radiation defects in nonmonotonous changes of microhardness is very difficult and requires a systematic study.

It is shown, that p-n junctions formed on p-type Si-Ge substrates by hightemperature diffusion of phosphorus are characterized by photosensitivity maximum in near-infrared radiation area of 2-2,4µm, which intensity significantly increases by the influence of high-energy electrons irradiation. It is resistant to thermal annealing at 400°C temperature for 1hr.

Presented works reveal the role of defects formed by thermal, radiation and deformation in modification of structural-sensitive physical-mechanical and electrophysical properties of substrates and p-n structures of Si-Ge alloys. This circumstance is very important for modification of p-n junctions characteristics formed on Si-Ge alloys substrates with determining electrophysical properties.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ
შრომებში:

1. Bokuchava G., Guldamashvili A., Nardaya Yu., Salukvadze Z., Sichinava A., Nebieridze Ts. "Boron Carbide Synthesis by Boron Implantation with Carbon Ions". Proc. XX Int. Conf. Phys. Radiat. Phenom. Radiat. Mater. Science. (XX ICPRP), Alushta 2012. pp. 281-282.
2. Kurashvili I., Sanaia E., Darsavelidze G., Bokuchava G., Sichinava A., Tabatadze I., Kuchukhidze V. Physical-Mechanical Properties of Germanium Doped Monocrystalline Silicon. Journal of Materials Science and Engineering A 3 (11) (2013)
3. Дарсавелидзе Г., Бокучава Г., Сичинава А., Табатадзе Я., Курашвили И., Чачхиани З. "Влияние германия на физико-механические свойства массивных кристаллов $Si_{1-x}Ge_x$ ($x \leq 0.03$)". Труды 16-го международного симпозиума: Упорядочение в минералах и сплавах. 12-17 Сентября, 2013, с. 186-189. Ростов на Дону-Туапсе, Россия.
4. სიჭინავა ა. "გერმანიუმის გავლენა მონოკრისტალური სილიციუმის მიკროსისალესა და არადრეკად მახასიათებლებზე". განათლება 1(10)2014, გვ. 153-156.
5. სიჭინავა ა. ტაბატაძე ი., ყურაშვილი ი., ჩუბინიძე გ., დარსაველიძე გ. "რეალური სტრუქტურის გავლენა ბორით ლეგირებულ მონოკრისტალების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე". განათლება 1(10)2014, გვ. 157-160.
6. სიჭინავა ა. ტაბატაძე ი., ყურაშვილი ი., დარსაველიძე გ. " $Si_{0.98}Ge_{0.02}$ შენადნობების მასიური კრისტალების თერმული გაფართოებისა და ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების ტემპერატურული ცვლილებები". განათლება 2(11)2014, გვ. 132-135.
7. სიჭინავა ა., ყურაშვილი ი., ჩუბინიძე გ., დარსაველიძე გ. "ზედაპირების დამუშავების გავლენა $Si_{1.5}Ge$ შენადნობის ძვრის დინამიურ მოდულზე". განათლება 2(11)2014, გვ. 136-139.
8. Guldamashvili A, Bokuchava G., Nardaya Yu., Nebieridze Ts., Sichinava A. Ion-Implanted Semiconductor Neutron Sensor (IISNS). Proceedings of International Conference. Nuclear Radiation Nanosensors and Nanosensors Systems. (6-9 March 2014 Tbilisi, Georgia). Tbilisi, Georgian Technical University. 2014, p. 122-125.

